



TITLE:

パルスUCN源としての中性子ドップラーシフターの開発(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

今城, 想平

CITATION:

今城, 想平. パルスUCN源としての中性子ドップラーシフターの開発. 京都大学, 2017, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2017-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k20167>

RIGHT:

(続紙 1)

京都大学	博 士 (理 学)	氏名	今城想平
論文題目	パルス UCN 源としての中性子ドップラーシフターの開発		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>超冷中性子 (UCN) を用いた研究開発を日本国内で円滑に進めるためにUCNを生成する中性子ドップラーシフター(DS)を開発し、J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) の BL05 NOPビームラインに敷設した。UCN とは運動エネルギー 240 neV, 速度 6.8 m/s 以下 (de Broglie 波長 58 nm 以上) にまで減速された超低速中性子である。</p> <p>中性子は波長が充分長くなると物質中の無数の原子核と同時に相互作用し、その平均として原子核の集団をその境界で高さ 100~200 neV 程度の一様なポテンシャル障壁として感じる。UCNでは運動エネルギーの低さゆえにその障壁を超えられずなめらかな物質表面で全反射される。また中性子は 1 T の磁場に対して ± 60 neV, 地表付近の重力に対して高さ 1 m につき 100 neV のポテンシャルエネルギーを受け、それらは UCN にとっては自身の運動エネルギーと同程度の変化となる。このような特徴からUCNは高い物質ポテンシャルを持つ原子で構成された容器や磁場で成形された容器に気体のように貯蔵することができ、中性子電気双極子モーメント (nEDM) 探索や中性子寿命測定などの長時間の中性子貯蔵が必要とされる実験においてその測定精度向上に貢献してきた。ゼロでない有限のnEDMが存在すれば時間反転操作に対してスピンは反転するが、 nEDM は不変であるため時間反転対称性の破れの証拠となる。また素粒子標準模型が予言する$10^{-30} \sim 10^{-32}$ e・cmより大きな nEDM が存在すれば標準模型を超える新しい物理の間接的証明となり、見つからなくとも上限値の更新によって新しい物理理論に対して制限をかけることができる。中性子寿命はビッグバン元素合成における^4Heの質量存在比を決定し、その測定精度向上は中性子寿命から求められた存在比と遠方宇宙の観測から直接求められた存在比との比較を通して、ビッグバン元素合成理論のより正確な検証を可能とする。UCN は階段型ポテンシャルに対する波束の反射が示唆するように反射時に物質内部に浸透するため、物質表面下の領域でのポテンシャルの振る舞いやフォノンの分散関係の測定においても有用なプローブとなる。DSは後退する中性子反射鏡に中性子ビームを反射させ、野球のバントのように運動量を奪うことで UCN にまで中性子を減速する装置である。鏡面での反射は中性子の位相空間密度を増加させないため、原理的には、DSによって生成された UCN の位相空間密度には入射ビームの位相空間密度がそのまま反映される。ドップラーシフター法は大阪大学核物理研究センター等で開発されている UCN 生成時に位相空間密度を増加させるスーパーサーマル法と比べると UCN 体積密度等で劣るが、減速機構が簡素なため粒子追跡シミュレーションを用いた UCN フラックスおよび空間分布の厳密な見積もりを可能とする。またDSで減速された中性子は短いパルス時間構造を持ち、それゆえ飛行時間法に基づいたエネルギースペクトル解析のソースとして適している。</p> <p>開発されたDSは、垂直に入射する速度 68 m/s の中性子を反射率 23% で反射できる人工多層膜ミラー (m=10 ミラー) を搭載し、半径 32.5 cm の腕にこれを設置して 2000 rpm で回転させることで 136 m/s の極冷中性子を UCN へと減速する。生成された UCN はパルス時間幅 4.4 ms の鋭い時間構造をもつ。DSまでのビームラインにはスーパーミラーガイドや集光ガイドを導入した光学的なビーム増強が行われ、J-PARC 1MW 運転時には計数率 80 cps, 生成直後の体積密度 1.4 UCN/cm³ の UCN が生成される見通しである。この体積密度は Argonne National Laboratory の Dombeck らが開発し Brun らが 1980 年に報告した先行研究のDSの UCN よりも 12 倍以上大き</p>			

な値である。J-PARC/MLF の極冷中性子ビームの位相空間密度は極めて大きいため、それを反映したこの UCN の位相空間密度はDSまでの輸送損失や $m=10$ ミラーの反射率を考慮してもなお大きく 6.0×10^{-2} neutrons/cm³/(m/s)³ あり、UCN 源として現在最も有名かつ多くの実験に利用されているフランスの研究用原子炉 Institut Laue-Langevin の PF2 ビームラインにおいて生成されている UCN のものと同程度の大きさを持つ。

日本のNOP グループは J-PARC 線形加速器を有効利用した核破砕中性子源を新設して大強度パルスUCN を生成し nEDM 探索を行う計画 (J-PARC P33) を提案している。DSは本計画の実験装置の研究開発において最適なテストソースとなる。

また、ビームパワー 1MW においてDSが生成する UCN 体積密度は nEDM の現在の上限値が得られた実験での実験容器中の UCN 体積密度と同程度であるため、DSを装置開発だけでなく物理実験に用いることも不可能ではない。たとえば UCN 生成点の近傍に UCN 生成タイミングに同期して開閉するシャッターを取り付ければ、パルス UCN 源であるDSをパルス UCN のピーク体積密度と同等の密度を持った連続 UCN 源のように運用でき、高い体積密度での UCN 貯蔵実験が行える。現在このDSは UCN 貯蔵容器を用いた UCN 反射率計の実験などに利用されている。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

今城想平君は極限まで冷却した中性子ビームのJ-PARCにおける生成に成功した。荷電粒子などの通常扱われるビームと違い、エミッタンスや速度分布が極端に大きな中性子ビームの位相空間内操作の実験計画や、測定で得られた分布の位相空間における分析などが重要な項目であった。この実験及びその解析に於ける今城想平君の具体的貢献としては、以下のものが挙げられる。

- a) シミュレーションを用いたスーパーミラーガイドの設計、設置、性能評価
- b) 集光ガイドの設計、製作、設置
- c) UCN検出器のアップグレード(アンプ交換、ガス交換)とその性能評価
- d) 上記を組み合わせたUCN生成実験とその性能評価
- e) BL16におけるドップラーミラー反射率の再評価
- f) シミュレーションを用いたDSからのUCNスペクトル解析

特に、解析に於いてその類い希なこだわりを持って綿密なシミュレーション、検討を行って緻密な議論を進め、論文にまとめている。具体的には、観測されたスペクトルに関してシミュレーションとの不一致を突き詰めるため、ドップラーミラーの反射率再評価を提案してBL16で測定を行い、過去に測定したものと最大20%程度異なる値を得た。この測定により、過去の反射率はミラーの一部分のみの測定であり、実際に使用している条件とは異なっていたということが判明した。新たに測定した反射率をシミュレーションに導入したところ、UCNスペクトルを定性的、定量的によく再現することができるようになった。また、TOFスペクトルについて一般に使用される精度以上に突き詰めるため、通常考慮されていないモデレーターの大きさや中性子減速時間を計算に入れ、より詳細なシミュレーションを確立している。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成29年1月13日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降